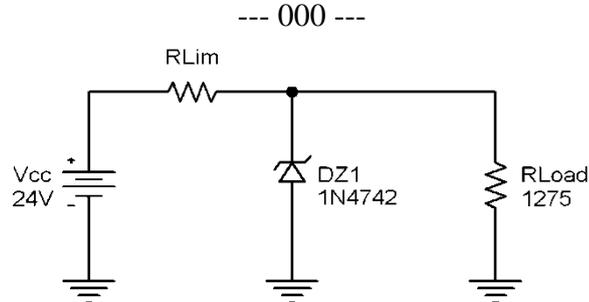


1 Ejercicios tipo de diodos Zener

1.1 Calcule el circuito estabilizador mediante diodo zener de la figura. Obtenga la corriente a través de la carga, teniendo en cuenta una corriente por el diodo zener del 50% de I_{ZM} , la corriente total solicitada a la fuente y la resistencia limitadora del diodo zener.



Obtenemos los valores característicos del zener del circuito, es decir:

$$\begin{aligned}V_{Zener} &= 12V \\Z_{Zener} &= 9\Omega \\I_{ZM} &= 76mA\end{aligned}$$

Como la tensión zener supera los 5.6V utilizaremos la aproximación para calcular la tensión en bornes del diodo. Teniendo en cuenta el 50% de la corriente zener máxima, nos queda

$$V_{Z(KA)} = V'_Z + (Z_Z \cdot I_Z) = 12 + (9 \cdot 38 \cdot 10^{-3}) = 12.34V$$

Esta tensión también será la existente en bornes de la carga, con lo cual la corriente a través de la misma tendrá un valor de

$$I_{Load} = \frac{V_{Z(KA)}}{R_{Load}} = \frac{12.34}{1275} = 9.67mA$$

Sumando esta cantidad a la que circula por el diodo zener obtendremos la corriente total solicitada a la fuente.

$$I_T = I_Z + I_{R_{Load}} = 38 \cdot 10^{-3} + 9.67 \cdot 10^{-3} = 47.67mA$$

Esta corriente también es la que circula por la resistencia limitadora, encargada de polarizar el zener en zona de ruptura, que deberá tener un valor de

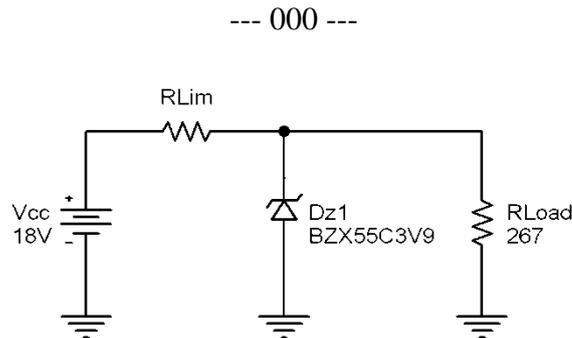
$$R_{Lim} = \frac{V_{CC} - V_{Z(KA)}}{I_T} = \frac{24 - 12.34}{47.67 \cdot 10^{-3}} = 244.59\Omega$$

Además, podríamos calcular la potencia disipada por la resistencia limitadora y la carga del circuito, mediante el efecto Joule, que serían de

$$P_{R_{Lim}} = R_{Lim} \cdot I_T^2 = 0.55W$$

$$P_{R_{Load}} = R_{Load} \cdot I_{Load}^2 = 0.11W$$

1.2 Calcule la resistencia limitadora del circuito estabilizador mediante diodo zener de la figura. Fije una corriente zener del 61% de I_{ZM} .



Obtenemos los siguientes valores del diodo zener BZX55C3V9

$$V_{Zener} = 3.9V$$

$$Z_{Zener} = 85\Omega$$

$$I_{ZM} = 95mA$$

Como la tensión zener es inferior a 5.6V no utilizaremos ninguna aproximación para obtener el valor de la tensión en bornes del diodo. Aplicando la ecuación, nos queda

$$V_{Z(KA)} = V'_Z = 3.9V$$

Esta tensión será idéntica a la de los extremos de la resistencia de carga, con lo cual

$$I_{Load} = \frac{V_{Z(KA)}}{R_{Load}} = \frac{3.9}{267} = 14.6mA$$

Y aplicando la ecuación de la resistencia limitadora, obtendremos la resistencia limitadora necesaria para el correcto funcionamiento del circuito.

$$R_{Lim} = \frac{V_{in} - V_{DZ1}}{I_{zener} + I_{Load}} = \frac{18 - 3.9}{57.95 \cdot 10^{-3} + 14.6 \cdot 10^{-3}} = 194.34\Omega$$

Aclaración:

Si por despiste, se nos hubiese ocurrido obtener el valor de la tensión en bornes del zener mediante la ecuación 3.18, hubiésemos obtenido

$$V_{Z(KA)} = V'_Z + (Z_Z \cdot I_Z) = 3.9 + (85 \cdot 57.95 \cdot 10^{-3}) = 8.82V$$

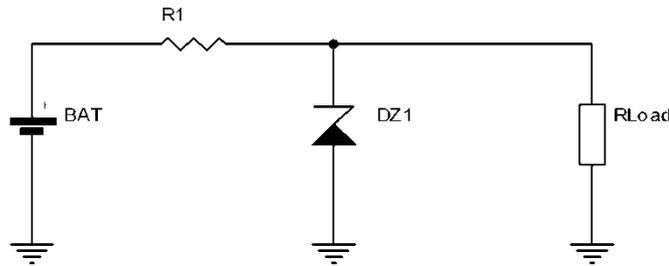
Un valor a todas luces erróneo y exagerado, ya que, tendríamos un estabilizador de tensión que nos ofrece 2.26 veces la tensión solicitada.

1.3 Con los datos del ejercicio, calcule la tensión de la batería para que el circuito de la figura funcione correctamente. Estime un valor adecuado de la corriente por el zener.

--- 000 ---

Los datos de este ejercicio son

$$\begin{aligned} V_{Zener} &= BZX55C9V1 \\ R_{Load} &= 1000\Omega \\ R_I &= 220\Omega \end{aligned}$$



De la tabla 3.19 obtenemos los valores del diodo zener

$$\begin{aligned} V_{Zener} &= 9.1V \\ Z_{Zener} &= 10\Omega \\ I_{ZM} &= 43mA \end{aligned}$$

Dado que la tensión zener supera los 5.6V utilizaremos la aproximación de la ecuación 3.18 para calcular la tensión en bornes del diodo. Estimaremos un 25% de la corriente zener máxima I_{ZM} , con lo que nos queda

$$V_{Z(KA)} = V'_Z + (Z_Z \cdot I_Z) = 9.1 + (10 \cdot 10.75 \cdot 10^{-3}) = 9.2V$$

Esta tensión también será la existente en bornes de la carga, con lo cual la corriente a través de la misma tendrá un valor de

$$I_{Load} = \frac{V_{Z(KA)}}{R_{Load}} = \frac{9.2}{1000} = 9.2mA$$

Sumando esta cantidad a la que circula por el diodo zener obtendremos la corriente total solicitada a la batería.

$$I_T = I_Z + I_{R_{Load}} = 10.75 \cdot 10^{-3} + 9.2 \cdot 10^{-3} = 19.95 \text{ mA}$$

La tensión necesaria en la batería será la suma de la tensión en bornes del diodo zener, más la caída de tensión en la resistencia limitadora, que la obtendremos mediante

$$V_{R_{Lim}} = R_{Lim} \cdot I_T = 220 \cdot 19.95 \cdot 10^{-3} = 4.38 \text{ V}$$

Con lo cual, la tensión necesaria en la batería será de

$$BAT = V_{Z(KA)} + V_{R_{Lim}} = 9.2 + 4.38 = 13.58 \text{ V}$$

1.4 Justifique si, en el circuito de la figura, se produce la destrucción del diodo zener por superación de la corriente zener máxima.

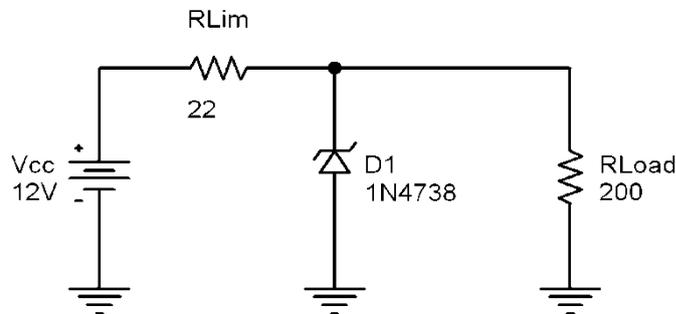
--- 000 ---

De la tabla 3.20 obtenemos los valores característicos del diodo zener

$$V_{Zener} = 8.2 \text{ V}$$

$$Z_{Zener} = 4.5 \Omega$$

$$I_{ZM} = 110 \text{ mA}$$



Aclaración:

En un principio se podría pensar en calcular la tensión en bornes del zener suponiendo, por ejemplo, un 50% la I_{ZM} , obtener la corriente por la carga, sumar estos valores de corriente y decidir en consecuencia. Esto es

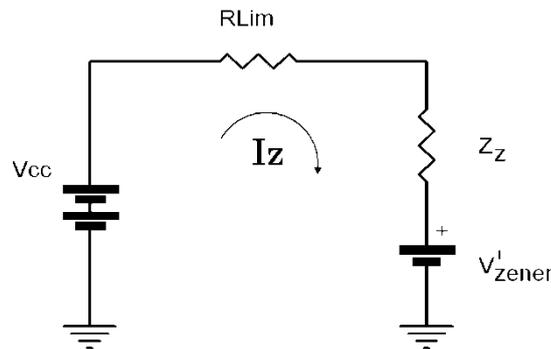
$$V_{Z(KA)} = V_Z' + (Z_Z \cdot I_Z) = 8.2 + (4.5 \cdot 55 \cdot 10^{-3}) = 8.44 \text{ V}$$

$$I_{Load} = \frac{V_{Z(KA)}}{R_{Load}} = \frac{8.44}{200} = 42.2 \text{ mA}$$

$$I_T = I_Z + I_{R_{Load}} = 55 \cdot 10^{-3} + 42.2 \cdot 10^{-3} = 97.2 \text{ mA}$$

En base a este cálculo, podríamos decidir que el valor de I_T es suficientemente inferior a I_{ZM} y, en consecuencia, **decidir erróneamente que el zener no se destruiría**. Pero esto sería tener una visión premeditada de lo que sucede en el circuito al desconectarse la carga. Lo que realmente sucede es lo siguiente.

Dado que se solicita si se excede el valor de I_{ZM} al desconectar R_{Load} y que debido a la tensión del diodo zener utilizaremos la aproximación matemática expresada en la ecuación 3.18, obtendremos el circuito equivalente siguiente para tal caso.



Calculando la corriente que circula por la malla, tendremos

$$I_Z = \frac{V_{CC} - V'_{Zener}}{R_{Lim} + Z_Z} = \frac{12 - 8.2}{22 + 4.5} = 143.39 \text{ mA}$$

Como podemos apreciar ahora, el valor obtenido es muy superior al máximo soportado por el diodo zener, con lo que **supondría la destrucción del diodo** si la carga se desconectase por algún motivo.

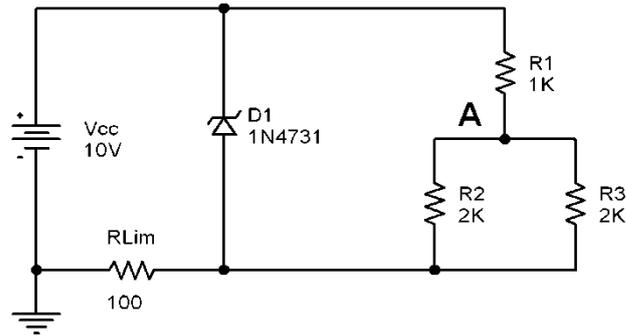
Moraleja: Realizar cálculos premeditados y sin base científica puede ser un mal consejero en la resolución de problemas de Ingeniería.

- 1.5 Calcule en el circuito de la figura la tensión entre el punto A y masa. ¿Cómo afectará y en qué medida la desconexión de R_1 a la tensión en bornes del diodo zener?.

--- 000 ---

De la tabla 3.20 obtenemos los valores característicos del diodo zener 1N4731.

$$\begin{aligned} V_{Zener} &= 4.3 \text{ V} \\ Z_{Zener} &= 9 \Omega \\ I_{ZM} &= 217 \text{ mA} \end{aligned}$$



El circuito de la figura es idéntico al circuito estabilizador clásico, salvo que la resistencia limitadora está en la rama inferior. El ejercicio nos solicita el valor de la tensión entre el punto *A* y masa y, al estar la resistencia limitadora antes de la conexión a masa, deberemos tener en cuenta la caída de tensión en esta resistencia y no pensar que la red de resistencias en derivación R_2 y R_3 están entre R_1 y masa como podría parecer en primera instancia.

Si observamos con detenimiento el circuito, las resistencias R_1 , R_2 y R_3 están conectadas entre los bornes del diodo zener, con lo que será muy fácil calcular el valor de tensión en esta red, máxime cuando R_2 y R_3 son del idéntico valor. Esto quiere decir que tenemos entre bornes del diodo zener dos resistencias en serie de

$$R_{Eq} = R_1 + (R_2 // R_3) = 1000\Omega + 1000\Omega$$

Luego la tensión en bornes de la resistencia equivalente es el 50% de la existente entre bornes del diodo zener. Al aplicar la ecuación 3.17, en bornes de R_2 y R_3 tendremos

$$V_{R_2 // R_3} = \frac{V_{Z(KA)}}{2} = \frac{4.3}{2} = 2.15V$$

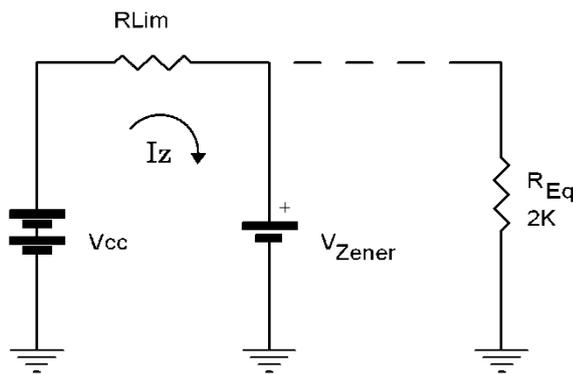
Si la tensión en bornes del diodo zener es de 4.3V, el resto hasta el valor de V_{CC} caerá en la resistencia limitadora, es decir

$$V_{RLim} = V_{CC} - V_{Z(KA)} = 10 - 4.3 = 5.7V$$

La suma de estas dos últimas cantidades será la solución de la primera pregunta del ejercicio, es decir

$$V_{A-Masa} = V_{RLim} + V_{R_2 // R_3} = 5.7 + 2.15 = 7.85V$$

Sobre la otra cuestión, **la desconexión de R_1 no afectará a la tensión en bornes del diodo zener**, ya que no estamos utilizando aproximación alguna para el cálculo de la tensión y ésta la consideramos fija. Siempre y cuando la resistencia equivalente que coloquemos en paralelo con el zener no le solicite una corriente suficiente como para despolarizarle, la tensión en bornes del zener será estable. El circuito resultante al desconectar R_1 es



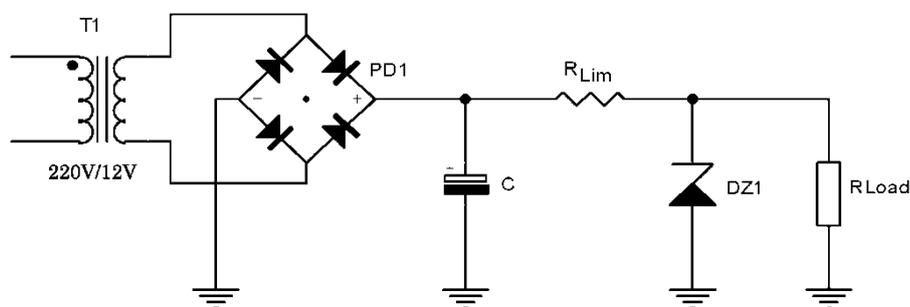
Si deseamos calcular ahora la corriente que circula por la malla, tendremos

$$I_Z = \frac{V_{CC} - V_{Zener(KA)}}{R_{Lim}} = \frac{10 - 4.3}{100} = 57 \text{ mA}$$

- 1.6 *Calcule una fuente regulada zener para obtener 7.5V a la salida con un rizado máximo de 100mV_{pp}. La carga a conectar será de 180Ω. Se considera oportuno que el diodo zener trabaje al 50% de su corriente máxima. El diseño deberá soportar la desconexión de la carga sin pérdida de funcionamiento. Calcule igualmente el factor de regulación del circuito, la corriente de pico en los diodos y la potencia disipada en la resistencia limitadora. El transformador utilizado será de 220/12V_{ef}.*

--- 000 ---

Antes de comenzar con la resolución definitiva del ejercicio deberemos estimar algunos valores iniciales del mismo. Estos datos nos permitirán averiguar si es posible un buen funcionamiento del circuito a priori. Para ello, empezaremos por calcular una estimación de la corriente total consumida por el conjunto, y con ello, suponer si el zener soportará la desconexión de la resistencia de carga sin su destrucción por exceso de corriente.



De la tabla 3.19 o 3.20, podremos seleccionar el zener adecuado para este circuito y obtendremos los datos que nos interesan del diodo. Al tener mayor potencia de disipación seleccionaremos mejor la tabla 3.20. El zener adecuado será el 1N4737, y sus datos más característicos son

$$\begin{aligned}V_{Zener} &= 7.5V \\Z_{Zener} &= 4\Omega \\I_{ZM} &= 121mA\end{aligned}$$

Estimación:

Considerando la tensión del diodo zener como la ofrecida por el fabricante, podemos estimar la corriente por la carga, que será aproximadamente

$$I_{R_{Load}} = \frac{V_Z}{R_{Load}} = \frac{7.5}{180} = 41.66 \text{ mA}$$

La corriente por el zener será la estimada en el enunciado del 50% de I_{ZM} , que tiene un valor de 60.5mA. Esto nos generará un consumo estimativo total del circuito de

$$I_{Total} = I_{Load} + I_{Zener} = 0.04166 + 0.0605 = 102.16 \text{ mA}$$

Conocidos estos datos podremos decir que

El circuito es posible que soporte la desconexión de la carga, ya que, incluso absorbiendo el diodo zener el total de la corriente de la carga, estaría trabajando aproximadamente al 84.4% de la corriente máxima admisible.

Pasando al cálculo efectivo del circuito, obtendremos la tensión en el diodo zener aplicando la aproximación expresada en la ecuación 3.18. El valor de la corriente zener es del 50% de I_{ZM} citados en el enunciado.

$$V_{Z(KA)} = V'_Z + (Z_Z \cdot I_Z) = 7.5 + (4 \cdot 0.0605) = 7.74V$$

Conocida la tensión de salida del diodo zener, podremos calcular de nuevo las corrientes por el circuito.

$$I_{Load} = \frac{V_{Zener(KA)}}{R_{Load}} = \frac{7.74}{180} = 43 \text{ mA}$$

Siendo la corriente total consumida de

$$I_{Total} = I_{Load} + I_{Zener} = 0.043 + 0.0605 = 103.5 \text{ mA}$$

Calculando ahora el valor del condensador de filtrado, ecuación 3.11

$$C = \frac{I_{Total} \cdot t}{\Delta V_{pp}} = \frac{0.1035 \cdot 0.01}{0.1} = 0.01035 \text{ F}$$

El tiempo de 10ms corresponde a la frecuencia de 100Hz de la señal de salida de un rectificador de onda completa, apartado 3.5.

Lo que nos obligará a utilizar un condensador de 10350 μ F para una tensión de 7.5V, algo más de 100mA y un rizado de 100mV_{pp}. Este dato es, a todas luces, muy elevado. Existen soluciones y circunstancias para mejorar este circuito que se ofrecerán más adelante.

Estamos ahora en disposición de calcular el valor de la resistencia limitadora del diodo zener y el factor de regulación de la fuente. Ecuaciones 3.24 y 3.22 respectivamente.

Antes debemos obtener el valor de tensión en el condensador, que será de

$$V_C = (V_{Sec} \cdot \sqrt{2}) - V_{PD1} = 16.97 - 1.4 = 15.57V$$

El valor de tensión del secundario hay que pasarlo a valor de pico al estar dado en valor eficaz, y los 1.4V del puente de diodos corresponde a una caída estimada de 0.7V por cada uno de los dos diodos que conducen en cada semiperíodo. Al ser la corriente total del circuito pequeña, aproximadamente una décima parte de la corriente total especificada por el fabricante, la estimación de 0.7V por diodo es correcta. Ver tabla siguiente de la serie 1N4001 a 1N4007.

Electrical Characteristics		T _A = 25°C unless otherwise noted							Units
Symbol	Parameter	Device							
		4001	4002	4003	400	400	4006	4007	
V _{RRM}	Peak Repetitive Reverse Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V
V _{RMS}	Maximum RMS Voltage	35	70	140	280	420	560	700	V
V _R	DC Reverse Voltage (Rated V _R)	50	100	200	400	600	800	1000	V
I _{RM}	Maximum Instantaneous Reverse Current @ rated V _R T _A = 25°C T _A = 100°C	5.0 500							μ A μ A
V _{FM}	Maximum Instantaneous Forward Voltage @ 1.0 A	1.1							V
I _{rr}	Maximum Full Load Reverse Current, Full Cycle T _A = 75°C	30							μ A
C	Typical Junction Capacitance V _R = 4.0 V, f = 1.0 MHz	15							pF

Tabla 3.1: Datos parciales de la serie 1N4001-7

Aplicando ahora la ecuación 3.24, nos queda

$$R_{Lim} = \frac{15.57 - 7.5 - (4 \cdot 0.0605)}{0.0605 \left(1 + \frac{4}{180} \right) + \frac{7.5}{180}} = \frac{7.828}{0.1035} = 75.62 \Omega$$

Haciendo lo mismo con la ecuación 3.22, obtenemos

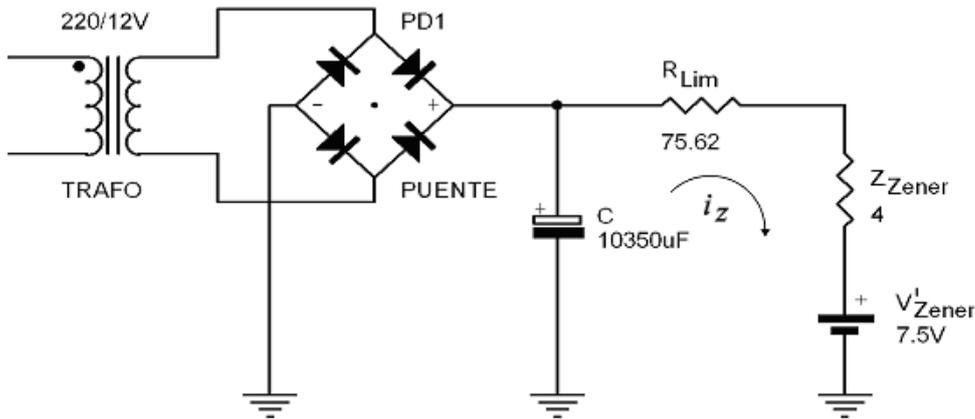
$$F_{reg} = \frac{4}{4 + 75.62} \cdot 100 = 5.02\%$$

Esto quiere decir que, las variaciones de tensión a la entrada del circuito, el diodo zener las atenúa hasta dejarlas en un 5.02% del valor inicial.

Para calcular la potencia disipada por la resistencia limitadora del diodo zener, aplicando el *efecto Joule*, nos queda

$$P_{Rlim} = R_{Lim} I_{Total}^2 = 75.62 \cdot 0.1035^2 = 810.06 \text{ mW}$$

Por otro lado, si se produjese la desconexión de la carga, el circuito se transformaría en el mostrado en la siguiente figura, y tendríamos una corriente por el zener de



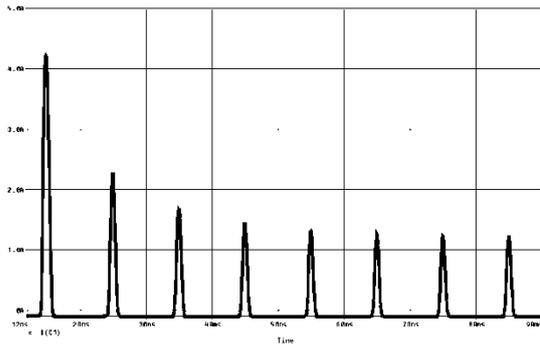
$$I_z = \frac{15.57 - 7.5}{75.62 + 4} = 101.35 \text{ mA}$$

Valor que está por debajo del límite máximo admisible por el diodo zener, los 121mA obtenidos de la tabla 3.20. Con lo cual, *el circuito no se estropearía ante una eventual desconexión de la resistencia de carga*.

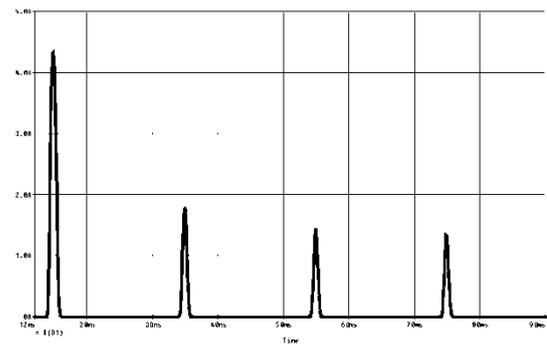
Si calculamos ahora la corriente que circula por el condensador aproximándole a su reactancia capacitiva, por efecto de la tensión de rizado del circuito, y teniendo en cuenta que el condensador estará trabajando como mucho la mitad de un semiciclo, nos queda

$$I_C = \frac{\Delta V_{pp}}{X_C} = \frac{0.1}{\frac{5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 0.01035}} = 1.3 \text{ A}$$

Que sumados a los 103.51mA del zener y la carga, nos darán un total de 1.4A que circularán por el puente de diodos. Observando las gráficas de corrientes y tensiones que nos ofrece el simulador, observamos que los cálculos se acercan bastante a los obtenidos teóricamente.



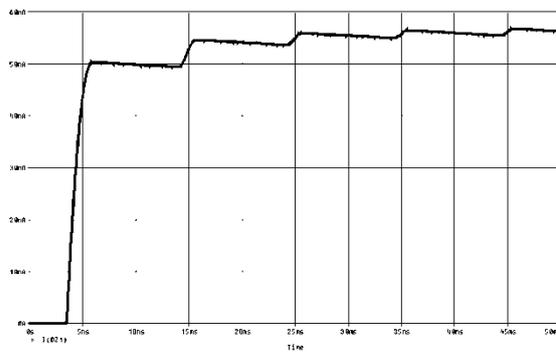
a) 1.25A



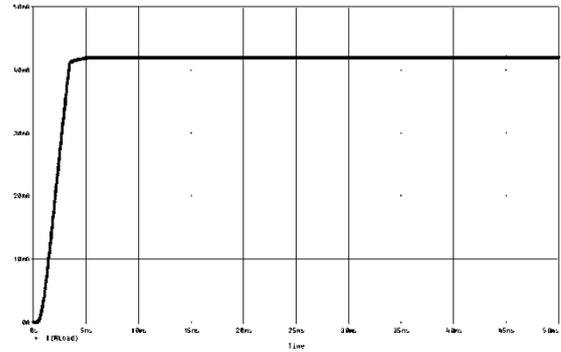
b) 1.35A

Corrientes en el condensador de filtrado y uno de los diodos del puente

Como se muestra, los datos de las corrientes por el zener y la resistencia de carga difieren poco de los cálculos teóricos.



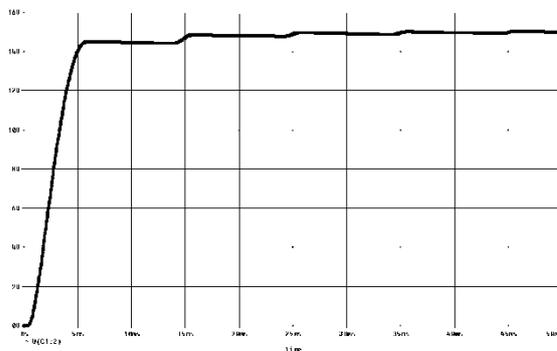
a) 57.03mA



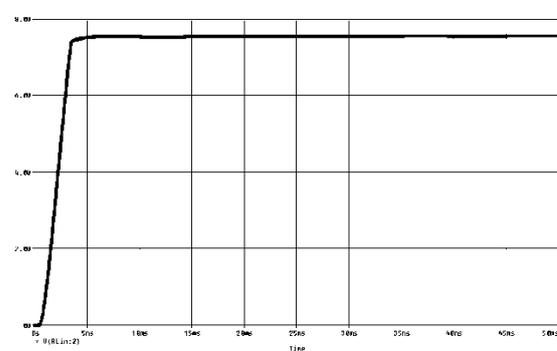
b) 41.9mA

Corrientes por el diodo zener y la carga

Para las tensiones en el condensador y salida del circuito igualmente se obtienen valores muy similares a los calculados teóricamente.



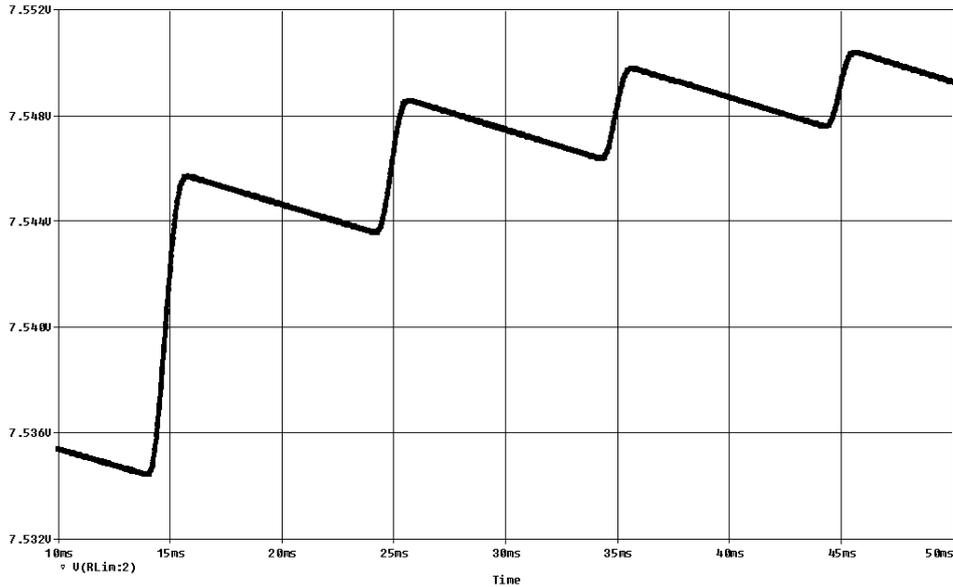
a) 15V



b) 7.55V

Tensiones en el condensador y salida del circuito

Si ampliamos la tensión del rizado a la salida del circuito, nos queda



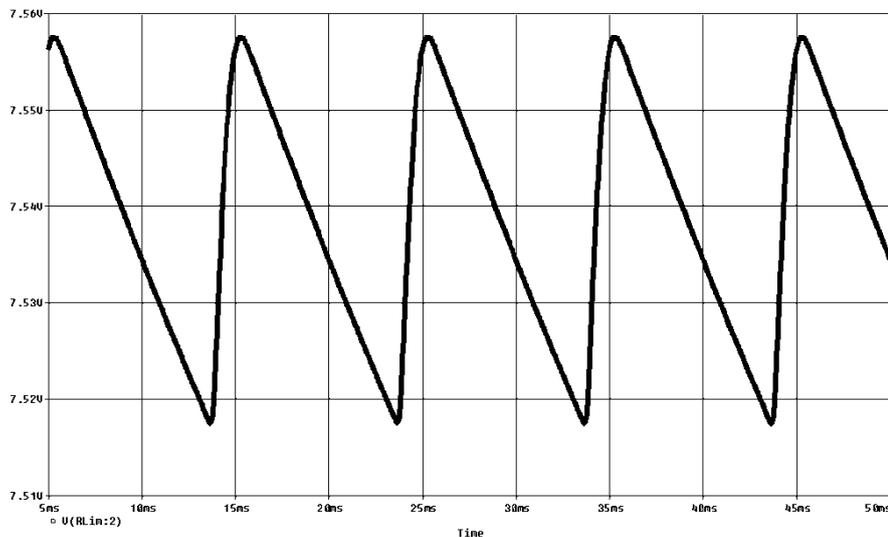
Ampliación del rizado a la salida del circuito. (2.7mV)

Este valor es muy inferior al solicitado. Esto se debe, fundamentalmente, a no haber introducido en el circuito la corrección del factor de regulación del diodo zener. Es decir, en nuestro cálculo todo el peso de la eliminación del rizado había recaído sobre el condensador.

Teniendo en cuenta este factor y para acercarnos con mayor precisión a los solicitados $100mV_{pp}$ en la carga, deberíamos calcular nuevamente el condensador con un valor igual a la disminución ofrecida por el factor de regulación del zener, es decir, el condensador sería de

$$C = 0.01035 \cdot 0.0502 = 519.57 \mu F$$

Realizando nuevamente la simulación del circuito con los estos valores, tenemos



Tensión de rizado en la salida del circuito con la corrección del Factor de regulación (40mV)

Aun alejándose este valor de los cálculos teóricos, se comprueba la mejora introducida por el zener, mediante el factor de regulación, en la disminución drástica (20 veces) del condensador de filtrado necesario para el correcto funcionamiento del circuito.

2 Problemas propuestos

- 2.1 Calcule la resistencia limitadora del diodo zener, R_1 , la corriente total consumida por el circuito y la tensión en R_{Load} .

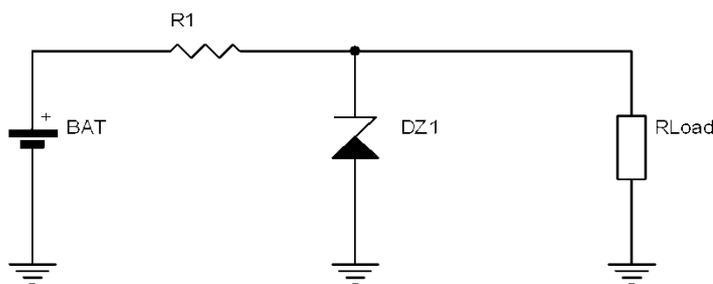
--- 000 ---

Los datos para solucionar este ejercicio son los siguientes

$$V_{Zener} = \text{BZX55C3V6}$$

$$R_{Load} = 470\Omega$$

$$V_{BAT} = 8V$$



- 2.2 Calcule los valores de la resistencia de carga que mantiene al zener dentro de la zona de ruptura.

--- 000 ---

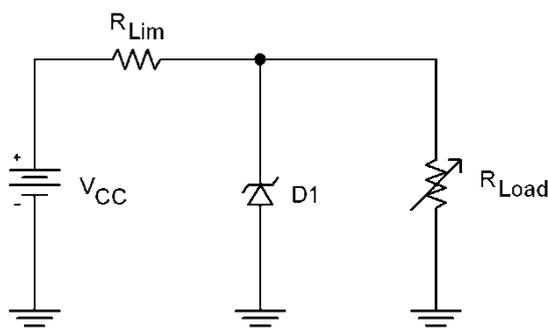
Los datos para solucionar el ejercicio son los siguientes

$$R_{Lim} = 73\Omega$$

$$D_1 = 1N4739$$

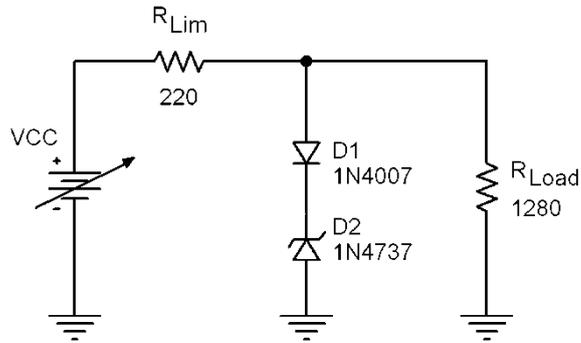
$$V_{CC} = 15V$$

$$I_{Zener} = \text{Considere entre el 10-80\% de } I_{ZM}$$



- 2.3 Calcule los valores de la tensión de alimentación que hacen funcionar al diodo zener de la figura en la zona de ruptura. Puede seleccionar un valor de I_{Zener} entre el 10-80% de I_{ZM} . $V_{D1} = 0.7V$.

--- 000 ---



- 2.4 Calcule el condensador y el transformador adecuados para el correcto funcionamiento del circuito de la figura. Estime, justificadamente, los valores que pueda necesitar para completar el cálculo

--- 000 ---

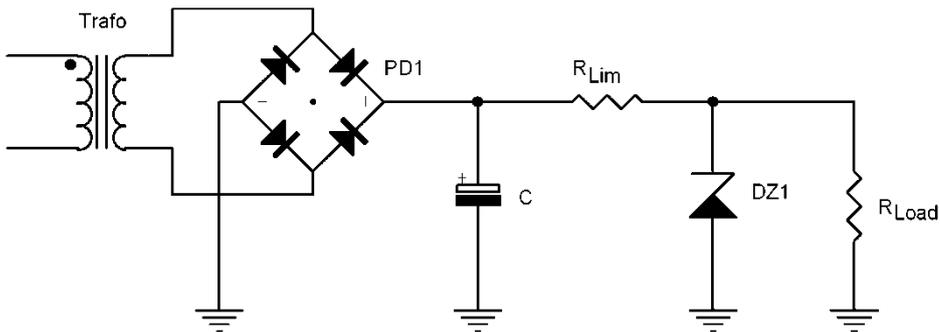
Los datos necesarios para la resolución de este ejercicio son los siguientes

$$V_{Zener} = BZX55C12$$

$$R_{Load} = 2K2\Omega.$$

$$R_{Lim} = 110\Omega$$

$$\Delta V_{pp} = 150mV$$



3 Bibliografía

1. Hambley, Allan R., *Electrónica*, Prentice-Hall, 2000, ISBN: 84-205-2999-0.
2. Savant, Jr., C. J., Roden, Martin S., Carpenter, Gordon L., *Diseño Electrónico. Circuitos y Sistemas*. Addison-Wesley Iberoamericana, 1992, ISBN: 0-201-62925-9.
3. Malik, Norbert R., *Circuitos Electrónicos. Análisis, Simulación y Diseño*, Prentice Hall, 1999, ISBN: 84-89660-03-4.
4. Irwin, J. David, *Análisis básico de circuitos en ingeniería*, Prentice Hall Hispanoamericana, 1997, ISBN: 968-880-816-4.
5. Cuesta, L., Gil Padilla, A. y Remiro, F., *Electrónica Analógica, Análisis de circuitos. Amplificación. Sistemas de Alimentación*, McGraw-Hill/Interamericana de España, 1991, ISBN: 84-7615-664-2.
6. Zorzano Martínez, Antonio, *Problemas de electrónica analógica*, Servicio de publicaciones de la Universidad de La Rioja, 1999, ISBN: 84-88713-96-7.